



高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

Advanced Soil Mechanics

高等土力学

· 研究生课程 ·

主编 白晓红



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



研究生课程

平台课课程群

建筑工程方向

道路与桥梁工程方向

地下工程方向

铁道工程方向

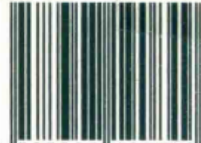
钢结构稳定性
 高等施工技术
 防灾减灾工程学
 混凝土结构理论及应用
 高层建筑结构分析与设计
 地下结构试验与测试技术
 土木工程施工新进展
 钢结构稳定理论
 高等土力学

韩庆华 赵秋红 芦 燕
 华建民
 李耀庄 何旭辉
 王震宇 邹超英 王代玉
 李正良 王汝恒
 刘新荣
 华建民
 夏军武 邵永松
 白晓红

项目策划 / 王 睿 白立华 曲生伟 蔡 巍
 责任编辑 / 刘小娟 李嘉琪
 责任校对 / 路亚妮
 装帧设计 / 吴 极

基本数字教学资源网站链接: <http://www.stmpress.cn>

ISBN 978-7-307-19084-9



9 787307 190849 >

定价: 39.00元

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

高等土力学

主编 白晓红



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高等土力学/白晓红主编. —武汉:武汉大学出版社,2017.2
高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材
ISBN 978-7-307-19084-9

I. 高… II. 白… III. 土力学—高等学校—教材 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 315829 号

责任编辑:刘小娟 李嘉琪 责任校对:路亚妮 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:11.5 字数:369千字

版次:2017年2月第1版 2017年2月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19084-9 定价:39.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方志 叶列平 何若全 沙爱民 范峰 周铁军 魏庆朝
委员:王辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉
周云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高波
委员:丁克伟 丁建国 马昆林 王成 王湛 王媛 王薇
王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒
王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方俊
龙广成 申爱国 付钢 付厚利 白晓红 冯鹏 曲成平
吕平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅
刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁皑 许伟 许程洁 许婷华
阮波 杜咏 李波 李斌 李东平 李远富 李炎锋
李耀庄 杨杨 杨志勇 杨淑娟 吴昊 吴明 吴轶
吴涛 何亚伯 何旭辉 余锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全
张红 张纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元
张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰
胡世阳 侯建国 姜清辉 娄平 袁广林 桂国庆 贾连光
夏元友 夏军武 钱晓倩 高飞 高玮 郭东军 唐柏鉴
黄华 黄声享 曹平周 康明 阎奇武 董军 蒋刚
韩峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾珂 雷宏刚
廖莎 廖海黎 蒲小琼 黎冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王睿 白立华 曲生伟 蔡巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。


本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

 本书基本数字教学资源及读者信息反馈表请登录 www.stmpress.cn 下载,欢迎您对本书提出宝贵意见。

丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

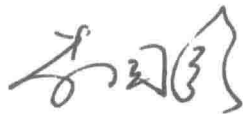
2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

目 录

1 绪论	(1)	3 土的渗透性与渗流	(33)
1.1 学科发展与特点	(1)	3.1 概论	(33)
1.1.1 学科发展	(1)	3.2 土的渗透性	(34)
1.1.2 学科特点	(2)	3.2.1 达西定律	(34)
1.2 高等土力学课程内容与学习方法	(2)	3.2.2 非饱和土的达西定律	(36)
1.2.1 高等土力学课程内容	(2)	3.2.3 达西定律的适用范围	(38)
1.2.2 高等土力学的学习方法	(3)	3.2.4 影响土渗透性的主要因素	(38)
参考文献	(3)	3.2.5 渗透系数的测定	(39)
2 土的形成与物质构成	(4)	3.2.6 渗气系数的测定	(40)
2.1 土的形成	(4)	3.2.7 渗透系数和渗气系数的联合测定	(40)
2.1.1 土的风化作用	(4)	3.3 土中孔隙水的渗流问题	(40)
2.1.2 土的成因类型	(4)	3.3.1 饱和土渗流问题	(40)
2.1.3 物理、化学作用	(7)	3.3.2 饱和土稳定渗流问题	(46)
2.2 土的物质组成	(8)	3.3.3 饱和土非稳定渗流问题	(49)
2.2.1 基础知识	(8)	3.3.4 饱和土渗流问题的有限元解法	(50)
2.2.2 土的矿物成分与颗粒大小关系	(10)	3.3.5 非饱和土渗流问题的基本控制方程	(55)
2.2.3 黏土矿物的特点	(11)	3.3.6 非饱和土渗流问题的有限元解法	(58)
2.2.4 土中水的能量概念	(13)	3.3.7 浑水渗流问题简述	(59)
2.2.5 非饱和土的相	(15)	3.4 渗透破坏与反滤保护	(62)
2.2.6 双电层理论	(17)	3.4.1 渗透破坏与防治	(62)
2.2.7 土的微观结构	(20)	3.4.2 反滤层与反滤准则	(67)
2.3 土的工程性质	(24)	参考文献	(69)
2.3.1 无黏性土的密实度	(24)	4 土的固结与流变	(70)
2.3.2 黏性土的稠度	(25)	4.1 有效应力原理	(70)
2.4 非饱和土的击实特性	(26)	4.1.1 基本知识	(70)
2.4.1 黏性土的压实性	(26)	4.1.2 广义有效应力原理	(71)
2.4.2 无黏性土的压实性	(29)	4.2 太沙基固结理论	(71)
2.5 污染土的工程特性	(30)	4.2.1 太沙基一维固结理论	(72)
2.5.1 地基土被污染的途径	(30)	4.2.2 太沙基二维与三维固结理论	(76)
2.5.2 地基土的水化学作用	(30)	4.3 比奥固结理论	(81)
2.5.3 地基土被污染后的主要危害	(31)		
参考文献	(32)		

4.3.1	固结方程	(81)	6.2.1	基础知识	(124)
4.3.2	比奥固结理论的曼德尔-克莱以 效应	(83)	6.2.2	三轴试验中的应力路径和破坏 取值标准	(129)
4.3.3	比奥固结理论与太沙基固结理论 的比较	(84)	6.3	黏性土的强度特性	(135)
4.4	单向固结的复杂情况	(86)	6.3.1	基础知识	(135)
4.4.1	荷载随时间变化情况	(86)	6.3.2	饱和黏性土的强度特性	(135)
4.4.2	土层厚度随时间变化情况	(89)	6.3.3	影响黏性土强度的因素	(136)
4.4.3	成层土地基情况	(90)	6.4	无黏性土的强度特性	(141)
4.5	土的流变理论	(92)	6.4.1	基础知识	(141)
4.5.1	土的流变现象	(92)	6.4.2	影响无黏性土强度的因素	(143)
4.5.2	常用流变模型	(92)	参考文献		(149)
参考文献		(98)	7	地基承载力	(150)
5	土的压缩性与沉降分析	(99)	7.1	均质土地基的极限承载力	(150)
5.1	基本知识	(99)	7.1.1	概述	(150)
5.1.1	概述	(99)	7.1.2	太沙基极限承载力	(151)
5.1.2	地基中的应力	(99)	7.1.3	梅耶霍夫极限承载力	(152)
5.1.3	土的压缩性	(104)	7.1.4	极限承载力公式的修正	(156)
5.2	地基沉降计算	(109)	7.2	层状地基的极限承载力	(158)
5.2.1	地基沉降的组成	(109)	7.2.1	汉森的加权平均法	(158)
5.2.2	瞬时沉降计算	(110)	7.2.2	双层地基的极限承载力	(161)
5.2.3	固结沉降计算	(113)	7.3	深基础地基承载力	(166)
5.2.4	次固结沉降计算	(116)	7.3.1	概述	(166)
5.2.5	考虑应力路径沉降计算	(116)	7.3.2	深基础的极限承载力	(166)
5.2.6	利用实测沉降资料预测后期沉降	(120)	7.3.3	桩的极限承载力	(168)
参考文献		(121)	7.4	浅基础地基承载力的讨论	(173)
6	土的抗剪强度	(122)	7.4.1	地基的破坏形式	(173)
6.1	土的抗剪强度理论	(122)	7.4.2	地基土的指标	(173)
6.1.1	基础知识	(122)	7.4.3	基础尺寸	(173)
6.1.2	莫尔-库仑强度理论	(123)	7.4.4	荷载作用方向	(174)
6.2	土的抗剪强度试验	(124)	7.4.5	荷载作用时间	(174)
			7.4.6	基础形状	(174)
			参考文献		(174)

1 绪 论

土是自然历史的产物。岩石经过分化、剥蚀、搬运、堆积而成的颗粒集合体,称为土。作为土力学研究的主体,土具有碎散性、多相性和变异性三大特性,从而也决定了土力学不同于一般连续介质力学的特点。

1.1 学科发展与特点 >>>

1.1.1 学科发展

岩土是人类最早接触的自然物质之一,也是人类祖先触及的最古老的材料之一。早在大禹治水中,就“兴人徒以傅土”,大兴土方工程进行治水;在秦代修筑驰道时采用“隐以金椎”的路基压实方法;又如在建造开封开宝寺木塔时,北宋著名木工喻皓就考虑到开封多有西北风,而将建于饱和土上的木塔的塔身有意识地让它向西北方向稍有倾斜,使得宝塔在风力长期和连续作用下逐渐复正,解决了塔基的沉降问题。在几千年连绵不断的历史发展中,人类建造了宏伟的殿堂楼宇、运河长城、大坝长堤,创造了璀璨的古代文明,充分证明古代劳动人民在工程实践中积累了丰富的土力学经验和知识。直到18世纪初,由于生产力发展水平的限制,人们对土的工程特性的认识仅停留在感性认识阶段,尚未提炼成系统的科学理论。

18世纪的工业革命推动了城市建设、铁路建设和水利建设,提出了许多与土有关的问题,从而促进了土力学理论的产生与发展。1773年,法国的库仑(Coulomb)通过大量试验创立了著名的库仑抗剪强度公式,提出了基于刚性土楔平衡的挡土墙土压力理论。1857年,英国的朗肯(Rankine)根据极限平衡理论,提出了另一个挡土墙土压力理论。1885年,法国的布辛奈斯克(Boussinesq)求解得出了弹性半空间表面上作用竖向集中力时,半空间体内任意点的应力和变形的理论解答。1902年,瑞典的费兰纽斯(Fellenius)为解决铁路塌方,提出了土坡稳定分析法。这些古典理论和方法的提出,为土力学的诞生奠定了基础。

1925年,美国太沙基(Terzaghi)出版了第一部《土力学》专著,标志着土力学成为了一门独立的学科,太沙基也被称为“土力学之父”。自20世纪60年代以来,土力学在城市建筑、水利、铁路、公路、电力、港口、机场、采矿等工程领域起到了极为重要的作用。伴随着数学、力学学科的发展和向土力学领域的渗透,为土力学提供了新的活力;计算机技术和现代测试技术的出现和快速发展为土力学提供了数值计算和试验分析的可能。关于土的本构关系的研究结束了以线弹性多孔介质模型研究变形,以刚塑性模型研究强度问题的局面,为土力学带来了根本性的“革命”。而土力学的研究对象也从饱和土扩展到非饱和土,饱和土的研究趋于完善的同时,非饱和土的研究日益丰富,为土力学的发展带来长远的影响。同时,从对地质土材料(既包括黏性土和无黏性土等普通土类,也包括黄土、红黏土、膨胀土、冻土等各种特殊性质的区域性土)的研究,进一步延伸到对类土材料、复合土材料的研究,使得土力学的研究范围进一步扩大。另一方面,将土作为复杂力学、化学特性的结构体,从微观观材料特性和双电子层理论、收缩膜理论的角度,描述土的物理性质,结合土的宏观力学特性,解释土材料的物理力学发展变化机理,为土力学提供一个新的研究途径。现代土力学的发展中,考虑土体材料、工程材料与工程环境相互作用的系统理论思想占据了重要的地位;将土质因素、力学因素与时间因素相结合,揭示土体长期变形与长期强度发展的规律成为土力学的一个新的热点课题。土动力学、非饱和土力学作为土力学的分支,建立了基本的理论体系和工程应用方法,意味着这门学科走向成熟。

从1925年土力学诞生至今,作为一门以正确反映、预测土的力学性质和行为,确保与各类工程有关的土

体在各种复杂环境下的变形、强度和稳定性为主要任务的学科,它得到了空前的开拓,已经从了解土和利用土走向对土的人工改造,从被动土体稳定性可估走向主动土体稳定性可控。

1.1.2 学科特点

太沙基曾说:“土力学与其说是一门科学,不如说是一门艺术。”清华大学李广信教授也曾说“土力学是一门‘很土’的力学”。土力学作为力学的一个分支,它还是一门年轻学科。

土力学的研究对象是土,土是多孔多相不连续介质,同时土也是地质历史的产物。因此,土具有碎散性、多相性和地质变异性——三个鲜明区别于其他一切介质的特性。土的这三个特性决定了土力学不同于其他力学的特点。

首先,土的强度不同于其他固体或液体材料,它不是取决于构成土体骨架的固体颗粒的强度,而是取决于颗粒间的摩擦力和一定的黏结作用。因此,土的强度较低,且主要是抗剪强度,这与约束和环境有关。强度问题是土力学的核心问题。

其次,土的变形主要是外力作用下,由于土颗粒相对位置的变化及一些颗粒的破碎而产生,土体体积的变形主要表现为土体中孔隙体积的减少。土的变形量远远大于连续介质。同时,由于土的三相性,土的变形亦受到强度、湿度和环境的影响,而且是与时间密切相关,土的变形问题是重要的工程问题。

最后,渗流是土力学第三个工程问题。饱和土体作为碎散颗粒的集合体,孔隙中充满了流体,在不等势情况下,流体将会产生运动,发生渗流,可能造成渗流变形,甚至产生渗流破坏。因此,土的渗流特性是土的重要工程性质之一。

针对土的以上三个工程问题,土力学应用三个重要定律予以解决。这三大定律组成了土力学的核心内容。三大定律之一的莫尔-库仑强度理论,通过剪切面上的剪应力 τ 与该面上的正应力 σ 之间的简单关系,较好地表达了土这种散体材料的摩擦强度的特点,揭示了土的破坏机理,广泛应用于极限平衡分析与计算当中。对于地基的变形分析,太沙基有效应力原理的提出为沉降定量计算建立了方法,这是土力学史上划时代的重要成果。对于土中水的渗流问题,达西定律很好地揭示了水在土中运动的规律,为解决土工问题和渗流问题奠定了理论基础。莫尔-库仑强度理论、有效应力原理、达西定律构成土力学的骨架,是解决工程问题的理论基础。

土的形成条件和组成特性决定了土本身是一个相互关联且流动变化的体系。在工程中往往采用钻探和物探的手段来了解地基的地质和水文情况。这些勘察方法是有限的,对于复杂的土层分布和土层性质不可能做到详尽和完全。加之,土的结构在受力过程中又在不断变化,所有这些导致土具有错综复杂的时空变异性。而土无论是作为土木工程材料还是作为土木工程结构的一部分或者环境,均对其耐久性提出了更为苛刻的要求,面临的挑战也更加严峻。因此,在学习和掌握土力学的基础理论和方法的同时,尚需不断试验和积累工程经验,以进一步完善和推动学科的发展。

1.2 高等土力学课程内容与学习方法 >>>

1.2.1 高等土力学课程内容

“高等土力学”是建立在土力学理论与应用成果基础之上的一门专业基础课程,它更加注意全面和深化对土的物理、化学和力学性质的理论和应用研究,解决复杂的工程问题。课程内容如下:

①土的形成与物质组成。从地质学角度阐述土的形成及成因对土的组成的影响,介绍土中水的能量、双电子层理论和土的微观结构特性,总结一般土的工程特性以及填土和污染土的特殊性。

②土的渗透性与渗流。通过对达西定律、渗透系数、土的渗透性及影响因素以及三相土中的渗气系数

和渗水系数联合测定的介绍,阐述了土的渗透性。通过对饱和土体中的稳态渗流和瞬态渗流以及非饱和渗流的介绍,研究水在土中的运动规律。介绍土体在动水压力作用下的渗流破坏及其防治措施。

③土的固结与流变。以有效应力原理和固结理论为基础,讨论广义有效应力原理、太沙基二维与三维固结理论和比奥固结理论,解释曼德尔-克莱以(Mendel-Cryer)效应,比较比奥固结理论与太沙基固结理论;总结单向固结条件下,荷载及土层厚度随时间的变化规律;简要介绍了土的流变理论。

④土的压缩性与沉降分析。针对瞬间沉降、固结沉降、次固结沉降的计算问题,给出多种沉降计算方法,并给出一种利用实测沉降资料预测后期沉降的推算方法。

⑤土的抗剪强度。基于库仑强度理论,阐述土体剪切破坏的概念。介绍室内常规试验、原位试验、室内特殊试验及三轴试验等土的抗剪强度试验方法。对黏性土与无黏性土的强度特性进行深入分析。

⑥地基承载力。从匀质土地基的极限承载力的确定出发[包括太沙基极限承载力、梅耶霍夫(Meyerhof)极限承载力],扩展分析层状土地基极限承载力特性和汉森平均值计算承载力,以及深基础地基极限承载力计算。对影响浅基础地基承载力的因素进行讨论。

1.2.2 高等土力学的学习方法

高等土力学研究遵循三部曲:试验研究(或工程调研)→科学归纳→模型验证(工程模拟)。土力学“先试验后理论”、岩土工程“先技术后科学”的发展特点,决定了试验研究、科学归纳、模型验证这三者相互联系、相互促进、相互补充。

学习高等土力学,应做到以下几点:

第一,要重视试验研究。室内和模型试验、现场测试是我们正确认识土的性质的必经之路,也是我们取得合理的土性参数的必要手段,是土力学发展的基础。因此在高等土力学的学习过程中,掌握土工试验方法和原理,了解现代测试技术和手段,是非常重要的。

第二,要重视归纳和抽象。每个土工问题都是一个复杂的系统。在遇到土力学问题时,须学会应用已有的理论知识,通过合理的推理,对在归纳试验资料的基础上的假设,进行抽象概括,建立相应的数学力学模型并进行分析研究。

第三,要重视模型验证。所建立的任何模型必须经过其他试验或工程应用的验证。也必须明确,任何一个好的模型都必有其适用性,由于土的多样性,系统的复杂性,任何模型都不可能是万能的、普适的。

第四,要树立全面、系统、发展的思维方式,以更好地认识和掌握土这个复杂事物,解决工程实践中的土工问题。正如谢定义教授所言:土力学要面对的既是具有错综复杂、时空变异的土材料与土样,又是正在向更深、更重、更大、更高发展的多种类型建筑对象,对稳定性和耐久性的苛刻要求,使它在这双重压力下协调发展。在这发展中,高等土力学必须始终贯穿一个“与时俱进”的发展观。

参考文献

- [1] 谢定义,姚仰平,党发宁. 高等土力学. 北京:高等教育出版社,2008.
- [2] 李广信. 岩土工程50讲——岩坛漫话. 2版. 北京:人民交通出版社,2013.
- [3] 赵树德,廖红建,徐林荣,等. 高等工程地质学. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 卢廷浩,刘祖德. 高等土力学. 北京:机械工业出版社,2008.
- [5] 龚晓南. 高等土力学. 杭州:浙江大学出版社,1996.

2 土的形成与物质构成

2.1 土的形成 >>>

地壳表层的土是在自然(地质)历史中经过复杂的变化形成的。由于地质营力作用,地质历史过程不同,土的成因、物质成分、结构、构造、物理化学特征各不相同。因此,了解土的形成历史对正确认识和评价土的工程性质具有重要的意义,但是详细说明各类土的形成过程已超出了高等土力学的范围,这里只作简要介绍。

2.1.1 土的风化作用

风化是外力地质作用的一种形式。岩石在各种自然力作用下,在原地产生崩解、破碎、变质作用,叫作岩石的风化作用。根据风化作用因素和性质可将其分为三类:物理风化作用、化学风化作用和生物风化作用。岩石、矿物发生机械破碎的过程称为物理风化作用,包括风、水、冰川、热胀冷缩、加载、卸载以及冻融交替的破坏作用。岩石、矿物发生化学变化并可产生新矿物的过程称为化学风化作用,包括水解作用、离子交换作用、氧化还原作用、碳化作用等。生物生长和活动对岩石产生的破坏作用称为生物风化作用,包括微生物、植被、树木的生长、活动、死亡对岩石的破坏作用。生物生长一方面引起岩石的机械破坏,另一方面,植物根分泌出的有机酸也可以使岩石分解破坏,植物死亡分解可以形成腐蚀酸对岩石产生分解作用。人类活动对岩石的风化也产生一定的影响,如边坡开挖使岩石新鲜面暴露,加剧了岩石的风化作用;工业废水排放使得水中的化学物质和岩石发生化学反应,因而对岩石产生破坏作用等。

物理风化、化学风化、生物风化三者不是单独存在,而是同时存在,综合作用、相互影响。物理风化将岩石破碎,形成岩石破屑(一般粒径在 0.02mm 以上),大大增加了颗粒表面积,从而增加了颗粒和水、气体的接触面积,有利于化学风化。化学风化的结果使岩石变质,整体性破坏,强度降低,还形成新的、很细的矿物颗粒,这又加剧了物理风化,而且其产物也更容易被水流或风力带走。

2.1.2 土的成因类型

土是在新近的第四纪形成的,又称第四纪沉积物。它在地表分布极广,成因类型复杂。不同成因类型的土,各具有一定分布规律和工程地质特征,下面简单介绍几种主要的成因类型。

2.1.2.1 残积土

岩石风化后残留在原地的碎屑堆积物称为残积土(图 2-1)。残积层与下伏的母岩没有明显界限,而是经过强风化层、弱风化层逐渐过渡到新鲜岩石,其矿物成分和母岩基本相同。残积土与强风化层很难区分,它常常是由于雨、雪、水流将细颗粒带走后残留的较粗颗粒的堆积物。因未经搬运,颗粒大小不均匀,棱角显著,无分选,无层理。一般分布在宽广的分水岭上和平缓的山坡或低洼地带。土体颗粒较大,均质性较差,强度偏低,压缩性高。

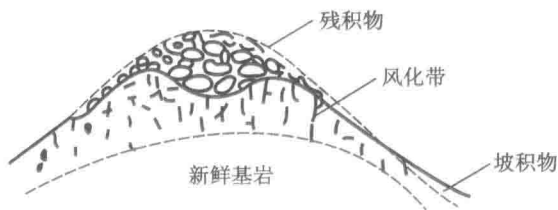


图 2-1 残积土

2.1.2.2 风积土

岩石碎屑由于风力剥蚀、搬运而沉积到他处的土称为风积土。因风力搬运具有明显的分选作用,搬运距离越远,颗粒越细。风积土主要有风成沙和黄土两种。

(1) 风成沙

因风力作用形成、搬运、堆积的沙粒级沙丘称为风成沙。烈风可以将大面积的沙搬运到一定距离之外,当风速减小时落下形成沙丘。沙丘在风力作用下也可以在地面上移动。由于风的分选作用,组成沙丘的沙粒在颗粒大小上极不均匀。

(2) 黄土

以风力搬运、堆积而成的黄色粉性土称为黄土。未经次生扰动、不具层理的黄土称为原生黄土。原生黄土经流水侵蚀、搬运重新沉积形成的黄土称为次生黄土或黄土状土。我国是世界上黄土分布最广、厚度最大的国家,面积约 63 万平方千米,黄土厚度从数米到数十米,甚至一两百米(如甘肃九州台黄土厚达 336m)。主要分布于甘、陕、晋、宁等地。黄土的组成以粉粒为主,质地均一,含钙质或黄土结核,多孔隙甚至肉眼可见,垂直节理发育,无层理,干燥时结构强度高,压缩性低。但有的黄土在自重应力或自重应力和附加应力联合作用下,受水浸湿后土体结构迅速破坏而发生显著附加下沉,这类黄土称为湿陷性黄土。前者称为自重湿陷性黄土,后者称为非自重湿陷性黄土。

2.1.2.3 沉积土

由水的侵蚀和搬运作用在别处沉积的土称为沉积土。雨水和雪水由河流的发源地,从四面八方,经小河汇成大河,浩浩荡荡流入大海,一路上侵蚀、搬运土层,形成各种各样的沉积土。

河边坡降的陡缓,搬运距离的长短,水位随季节的变化,洪水每年的差异,加之河道和湖泊的变迁,使得沉积土的层理构造更为复杂。

(1) 坡积土

岩石风化经过雨、雪水洗刷、剥蚀、搬运以及在土粒重力作用下,顺着山坡滑动,沉积在较平缓的山坡上形成的堆积物,称为坡积土(图 2-2),上部与残积土相连。坡积土因搬运作用很短,颗粒磨圆程度差,具有分选现象,下部多为碎石、角砾土,上部多为黏性土;土质不均匀,厚度变化大。特别是新近堆积的沉积土,结构疏松,压缩性高。

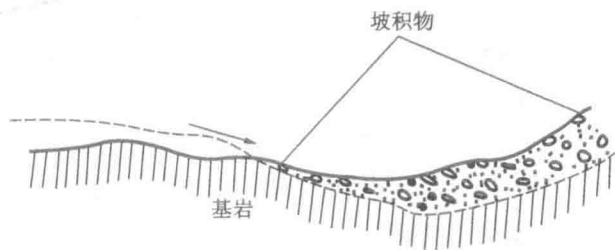


图 2-2 坡积土

(2) 洪积土

由暂时性山洪急流将山区高地的岩石、矿物碎屑,冲刷携带至沟口或平缓地带堆积而成的土,称为洪积土(图 2-3)。山洪携带的颗粒碎屑流出沟口后,因水流流速骤减而呈扇形沉积体,称为洪积扇。由于山洪常常是周期性产生,且每次大小不尽相同,故每次堆积物的性质不一样。洪积土常有不规则交错的层理构造,土质不均匀。一般山前较近处的洪积物颗粒较粗,压缩性较低;离山区较远的洪积物颗粒较细,成分较均匀,厚度较大,如果沉淀时间较长,压缩性较低;但是在上述两段的中间过渡地带,常因粗粒土和细粒土的透水性不同,而使地下水溢出地表形成沼泽地,导致土质较差,承载力较低,当进行工程建设时应慎重。

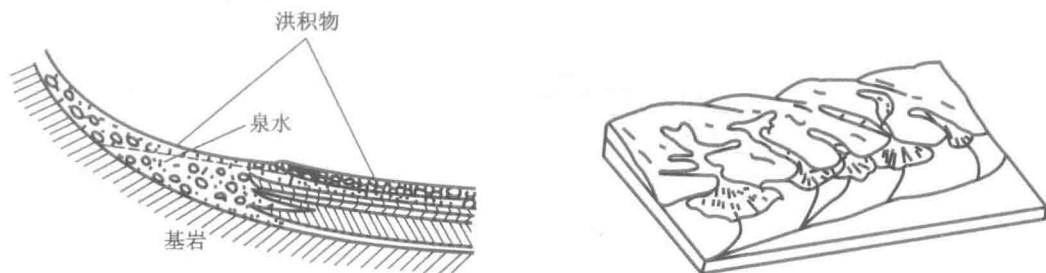


图 2-3 洪积土

(3) 冲积土

由于河流水力作用,将河流两岸基岩及其上部覆盖松散堆积物剥蚀、搬运、沉积在河流坡降平缓地带形成的沉积物,称为冲积土(图 2-4)。周期性的洪水也会剥蚀河流上游两岸的冲积土,搬运至下游形成冲积土。冲积土具有明显的层理构造。由于搬运作用显著,颗粒磨圆度好。从河流的上游到下游,沉积物质由粗变细,上游沉积物多为磨圆粗大颗粒,如漂石、卵石、圆砾等,中下游沉积物大多由砂砾逐渐过渡到粉粒和黏粒。

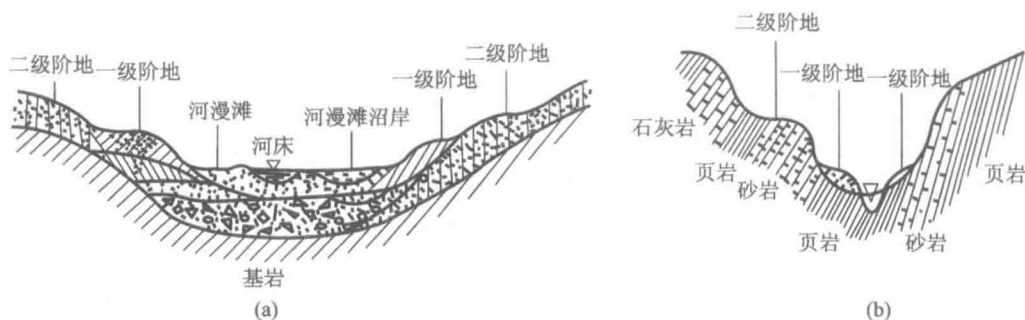


图 2-4 冲积土

(a)平原河流;(b)山区河流

河流冲积土在地表分布较广,可分为平原河流冲积土、山区河流冲积土和三角洲冲积土。

①平原河流冲积土。平原河流坡降小,流速慢,以侧向侵蚀为主,大多有河床、河漫滩和阶地等地貌单元[图 2-4(a)]。河床冲积土覆盖厚度较大,分布在整个河谷底范围内,而沉积的物质有卵石、砾石、砂、粉土、粉质黏土、淤泥等。河漫滩是在洪水期后,洪水满溢河床两侧携带的碎屑物质堆积而成,沉积的物质有细砂、粉土和粉质黏土,局部会夹有淤泥、泥炭等软弱层。值得注意的是,在牛轭湖的沉积物,一般是黏土,这是一种河道淤塞沉积物,通常处于欠固结状态,液性指数接近于 1.0。牛轭湖沉积物只是在表面变干,形成硬壳,硬壳层下的黏土依然很软。同时,硬壳层又可能被河漫滩沉积物覆盖,在现场勘探中需特别注意。河流阶地是在地壳升降运动和河流的侵蚀、沉积等作用相互配合下形成的,其沉积物是河床或河漫滩沉积物上升演变而来,因脱水干燥,工程性质得以改善,一般愈老的阶地,工程性质愈好。

②山区河流冲积。山区河谷两岸陡峭,河流流速大,沉积物较粗,分选性较差,厚度也不大[图 2-4(b)]。大小不同的砾石互相交替,形成水平排列的透镜体或不规则袋状。透水性好,可压缩性低,承载力高。

③三角洲冲积土。在入海处或湖泊因流速急剧减小,河流搬运的大量悬浮物质在河口形成的沉积物,叫作三角洲冲积土(图 2-5)。此类沉积物一般颗粒较细,含水量较高,呈饱和状态。沉积厚度一般很大,达数百米甚至数千米。三角洲冲积物构造非常复杂,通常可分为三个基本部分:顶积层、前积层和底积层;也可分为水上沉积部分和水下沉积部分。水上沉积部分主要是河床加河漫滩冲积物(包括砂、粉砂、黏土),由于多次沉积常有层理或透镜体。水下沉积部分由河流的冲积物和海或湖的沉积物交替或混合组成,是倾斜的沉积层,层理比较复杂。

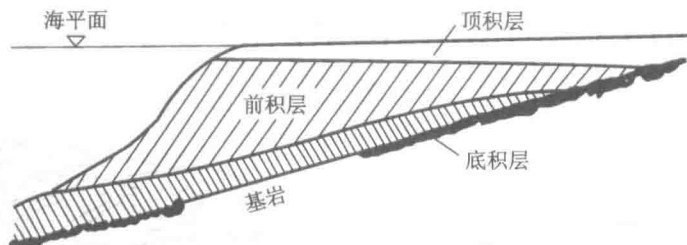


图 2-5 三角洲冲积土

(4)其他沉积土

除了上述三种成因类型的沉积土外,还有以下几种沉积土。

①海相沉积土,指由海洋作用沉积的堆积物。按照海水深度分区不同可将海相沉积土分为滨海沉积土、浅海沉积土、陆坡沉积土和深海沉积土,如图 2-6 所示。滨海区是指高潮位时淹没,低潮位时露出的地带,沉积物主要是卵石、圆砾和砂等粗颗粒土。浅海区是指大陆架水深 0~200m、宽 100~200km 的区域,沉积物主要是细颗粒砂土、黏性土、淤泥和生物化学沉积物。离海岸越远,沉积物质颗粒越细。陆坡区是浅海区与深海区的过渡陡坡地带,深海区指水深不小于 1000m 的区域。陆坡和深海沉积物主要是棕色黏土和含钙、含硅的软泥。

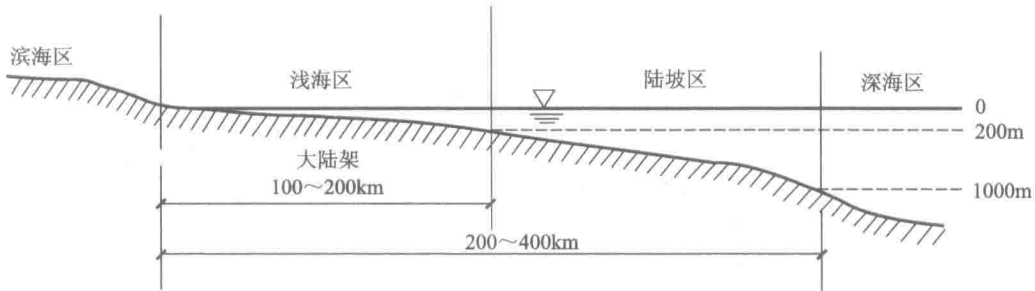


图 2-6 海相沉积土

②湖相沉积土,指由湖水作用沉积的堆积物。湖相沉积土组成复杂,在近岸带沉积物多数为粗颗粒的卵石、圆砾和砂土,在远岸带沉积物多数是细颗粒的砂土和黏性土。在湖中心区沉积物是黏土和淤泥,常夹有细砂、粉砂薄层。湖泊如果逐渐淤塞,可演变为沼泽,形成沼泽沉积物。沼泽沉积土主要是由半腐蚀的植物残余体构成。泥炭土含水率极高,渗透性差,压缩性高,抗剪强度很低。

③冰川沉积土,指由冰川作用沉积的堆积物。冰川活动具有极大的搬运能力,沉积作用是在融化过程中发生的。冰川沉积土特性取决于其搬运土的种类、搬运距离、坡度、压力等因素。根据冰川环境不同形成冰川沉积物、冰川-河流沉积物和冰川-湖泊沉积物。

2.1.3 物理、化学作用

恩格斯提出:“全部地质学是一个否定了的否定的系列,是旧岩层不断毁坏和新岩层不断形成的系列。”(《马克思恩格斯选集》第三卷,人民出版社,1977年)。

无论何种沉积物,在沉积后还会受到物理、化学作用,产生沉积后的变化。沉积后的物理、化学过程主要有下述几个方面。

2.1.3.1 风化作用

沉积物暴露在大气中,时刻都在经历着风化作用,该作用引起土的成分的逐步改变和颗粒尺寸的变化。暴露的细颗粒沉积物处于干燥状态时会产生收缩现象,导致风化过程加速。复杂的物理、化学反应使软黏土地基表面形成类似超固结状态的硬壳层。

2.1.3.2 固结作用

沉积物在上覆土重力作用下产生固结,孔隙体积减小,强度提高。这一过程也可称为压密过程。地下水位的下降也会使土体产生压密。地震以及人类活动引起的动荷载作用也会使土体产生压密,特别是无黏性土效果更明显。对沉积物的固结作用可提高土的强度,降低压缩性,提高膨胀势能,降低渗透性。

2.1.3.3 自生作用和成岩作用

沉积物在沉积处形成新的矿物称为自生作用。自生作用可使土颗粒变得更有棱角,孔隙比减小和渗透性降低。小的晶体和岩石碎片可以生长成较粗颗粒的集聚体。

因温度、压力和时间效应使沉积物由一种物质转化成另一种岩性类物质的过程称为成岩作用。

2.1.3.4 溶解作用

环境的变化可以导致沉积物中产生离子交换和可溶盐的淋溶。沉积物可以被不均匀的溶解作用以及紧随着的淋溶作用从沉积土中迁移。土洞、溶洞就是溶解作用的结果。

地球表面经历四个基本地质作用过程：地壳运动、剥蚀风化作用、搬运沉积作用、成岩作用。它们周而复始，形成一个永无休止的循环过程(图 2-7)。

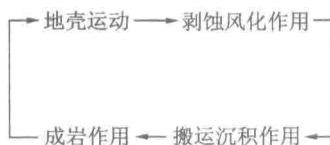


图 2-7 地壳循环

2.2 土的物质组成 >>>

2.2.1 基础知识

土是岩石风化的产物，由于母岩成分及风化程度的不同，形成不同的矿物类型，按其成因和性质可分为四大类。

(1) 原生矿物

原生矿物，即母岩物理风化的产物。主要有石英、长石、云母类矿物，其次为角闪石、磷铁矿等。这类矿物具有稳定或较稳定的化学性质、强或较强的抗风化能力，亲水性弱或较弱，是组成粗颗粒土的主要矿物成分。其对土的性质影响主要表现在颗粒大小组成、矿物类型、颗粒形状、表面特征、硬度等。

(2) 次生矿物

原生矿物进一步经化学风化作用而形成的新的矿物成分，即为次生矿物。在自然界中最常见的有黏土矿物、含水倍半氧化物和次生二氧化硅。

① 黏土矿物。

黏土矿物是次生矿物中数量最多的一种，也是黏粒组中的主要矿物成分。它是由各种硅酸盐矿物分解形成的含水铝硅盐矿物，颗粒较为细小，一般粒径小于 $5\mu\text{m}$ 。黏土矿物由硅氧四面体和氢氧化铝八面体两种基本结构单元组成。硅氧四面体是由 4 个氧原子、中间包 1 个硅原子构成的等边四面体，如图 2-8 所示。氢氧化铝八面体由 6 个氢氧根包围 1 个铝原子(有时为 1 个镁原子)构成，如图 2-9 所示。

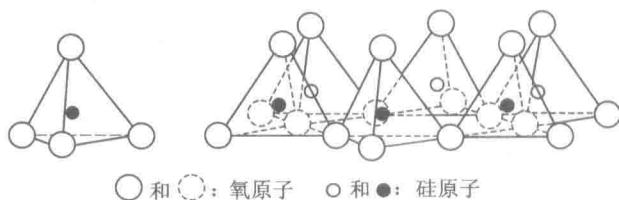


图 2-8 硅氧四面体

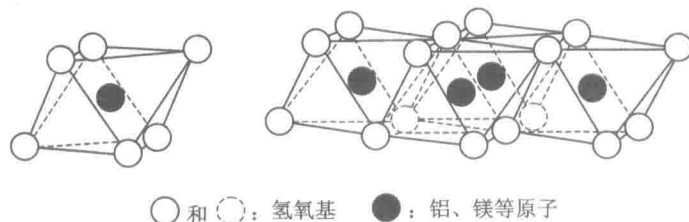


图 2-9 氢氧化铝八面体